

活火山における侵食地形解析による 土砂流出予測に関する研究

学位論文内容の要旨

雲仙普賢岳噴火を契機に、火山噴火による土砂災害を防止軽減するための砂防計画手法立案の原理構築が緊急課題となっている。連続的・集中的に発生する土石流に対しては、従来の最大規模流出土砂量の推定とそれに基づく土砂処理計画に加えて、集中期間の土砂量を推定して最大規模土石流と一定期間内の流出土砂量の双方に対応する土砂処理計画手法の構築が必須である。砂防計画における流出土砂量の予測問題は、1950年代に始まった砂防計画議論が展開される中で、本来もっていた長期流出と最大流出という二つの概念が、局所的土砂災害の頻発に対する対応策の展開から後者に偏る方向に陥ったことにある。とくに土砂輸送能力量を土砂水理学的方法によって決定論的に推定しようとする方向は長期土砂流出予測の課題解決を遅らせてきた。

この問題を解決するためには、長期降雨時系列とともに土砂生産・滞留・流出に関わる流域土砂移動時系列解析による土砂移動の長期時空間変動特性の解明が必須であり、流域土砂移動特性の構成複数要素間における時空間系列変動の相互関係の解明が必要となる。

本研究は、土砂の生産と流出を包括する土砂移動時系列変化特性の解明とこれに基づく長期的砂防計画手法の構築を目的とした。

第1章 土砂流出予測の課題

砂防計画における流出土砂量の概念をレビューして研究課題を明らかにするとともに、流域土砂移動特性を規定する主要要素としての土砂生産・土砂滞留・土砂流出現象の時空間的な概念整理を行い、本研究における土砂流出予測の課題を明確にした。そして、火山噴火に伴う火砕物被覆と元地形の変貌という大きなインパクトを受けた流域において、土砂生産・流出量の活発化にともなった数年から10年程度の期間内流出量の増大期と、その後の減少による定常状態への回復期とからなる活火山土砂流出均衡化現象の機構は、土砂生産（斜面侵食）特性解析から解明し得るものと考えた。

第2章 研究方法

土砂生産場の変動に関わる複数時期の空中写真判読と地形量計測に基づく侵食地形解析、および土砂生産と土砂流出の時系列推移の相互関係を明らかにするための傾向変動解析の意義と方法について述べた。研究対象火山・流域は、噴火直後から地形変動と土砂流出の量的調査が行われた雲仙普賢岳・水無川としたが、これは流域の土砂移動環境が火砕流噴火というインパクトによって著しく変貌した初期状況から土砂生産・流出の平衡化段階までの変動情報が蓄積され平衡化過程解析に適しているためである。

第3章 活火山における地形侵食と土砂流出の量的変化

既往研究レビューにより、活火山における噴火活動と土砂流出への影響を規定する要因の整理から、細粒火山灰の被覆による浸透能の低下と表面流の発生が土砂生産・流出に大きく関与していること、しかし流域全体としてこれらの変動推移を把握することには困難があることを指摘した。したがって土砂生産変動指標としては侵食地形を取り上げ、13時期の空中写真解析により、雲仙普賢岳における侵食による斜面地形変動実態を解析した。

その結果、水無川における土砂生産の主体がガリー侵食とその発達過程にあること、赤松谷・水無川上流・おしが谷の3支渓においてみられる土砂生産活発化時期のずれは火砕流流下方向の変化に対応していること、土砂収支による流出土砂の変動傾向は地形解析から得た生産土砂の変動傾向とよい対応を示していることなどが明らかとなった。

第4章 土砂生産・流出速度の時空間分布特性

土砂の生産・流出速度に着目して、流域侵食の時空間変動を分析した。その結果、土砂生産速度の推移には緩急があり、急速化と定常化を繰り返して平衡化に至ることが明らかになった。すなわち土砂生産と土砂流出との量的関連について検討したところ、土砂生産速度が定常状態にある時には、流出土砂量が生産土砂量を下回り溪床内に土砂が滞留するが、大規模土砂移動時にこの滞留土砂が流出すること、したがって期間内の土砂収支においては生産土砂量と流出土砂量がほぼ一致することが分かった。以上の解析結果から、急速に進展する地形変動のうち、ガリー侵食・発達過程を表すガリー形成速度が土砂生産の変動指標となること、さらに流域面積で除した単位土砂生産速度は単位土砂流出速度に良好に対応することが明らかとなった。したがって、土砂生産情報に基づいた流出土砂量予測の可能性が見出された。

第5章 流出土砂量の予測

土砂生産と土砂流出の時系列変動に関わる実態解析に基づいた不安定土砂平衡化モデルを構築しその検証を行った。不安定土砂平衡化を規定する要因として、浸透能や火砕流堆積物深の変化などが考えられるが、なかでも土砂輸送能力に反映する降雨規模が重要であることを示した。そして流域内不安定土砂の平衡化過程において、土砂流出速度は土砂生産速度に対応し、滞留土砂の増加速度は土砂流出速度と生産速度の差で表される。このことから、任意時点の累加流出土砂量は、土砂流出速度(=土砂生産速度-滞留速度)を微分係数とし、将来の平衡化時に収束値をもつ変動傾向を表すモデルを構築し、ロジスティック関数で示される流出土砂量累加変動式を提示した。このモデル式を雲仙普賢岳の実測資料で検証し、実績で44回発生した土砂流出(土石流)による累加流出土砂量に対し、約1/2の前半24回までの実績値からの予測結果が良好に適合するという結果を得た。さらに、有珠山1977-78噴火時の土砂流出過程に適用を試みたところ、有珠山の事例では土砂流出の活発化=土砂流出速度の急速化に2回のピークがあることから流出土砂量累加変動式の2分割による予測によって本モデルが適用できることを確認した。以上の結果から、地形変動とくに侵食量解析による土砂生産速度の判別手法、ならびにその傾向変動予測を用いた土砂量予測手法を提起した。流出土砂量累加変動式は、侵食地形解析に基づく土砂生産速度に対応していることから、流出土砂量予測に土砂生産情報を適用できることが示された。さらに、噴火様式の異なる他火山においても同様手法を適用し得る方向性を提示した。

第6章 砂防計画への展開

多様で変動の大きい土砂移動現象を主体としている流域に適用すべき砂防計画の概念として、対象とする土砂移動を生起させた原因別に土砂量規模と対応期間が異なること前提とし、それぞれの特徴に応じた土砂処理対策を計画し得る総合的砂防計画を提案した。と

くに突発的な大規模地形変動をともなう流域荒廃によって土石流による流出土砂量の激増が継続する流域においては、土石流による土砂氾濫災害区域が拡大するために、的確な土砂量予測に基いた土砂処理計画が重要となる。本研究の成果によって、これに対する具体的な対応策として、土砂生産情報解析に基づく流出土砂量予測式による多様な変動状況に応じた土砂処理計画手法を提示した。すなわち近未来における火山噴火や大規模地震による流域荒廃・危機管理に対する砂防計画立案手法が提示された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 新 谷 融
副 査 教 授 笹 賀 一 郎
副 査 教 授 中 村 太 士
副 査 助 教 授 山 田 孝

学 位 論 文 題 名

活火山における侵食地形解析による 土砂流出予測に関する研究

本論文は、図45、表13を含む総頁数109の和文論文であり、他に参考論文10編が添えられている。

雲仙普賢岳噴火を契機に、火山噴火による土砂災害を防止軽減するための砂防計画手法原理の構築が緊急課題となっている。とくに継続的土石流災害の軽減には、最大流出土砂量だけでなく、長期流出土砂量にも対応し得る土砂処理計画手法の構築が必須となった。砂防計画にあっては、従来より長期流出と最大流出の推定が欠かせないものとされてきたが、全国的に頻発した局所的土砂災害への応急策の展開から長期土砂流出に関する予測手法の構築が遅れてきた。

長期土砂流出予測には、流域土砂移動（土砂の生産・滞留・流出）の時系列解析による土砂移動の時空間変動特性の解明が必須となる。本研究は、土砂の生産から流出に至る土砂移動時系列変動特性の解明とこれに基づく長期的砂防計画手法の構築を目的としたものである。

I. 研究課題の設定と方法

流域における土砂移動現象の時空間的な概念整理を行い、本研究における土砂流出予測の課題を明確にした。すなわち、火山噴火に伴う火砕物被覆・地形変貌流域においては、数～10年程度の土砂生産・流出活発増大期とその後の減少回復期とからなっていること、この土砂流出平衡化現象は斜面侵食特性解析から解明し得ることを論じ、さらに複数時期の空中写真判読・地形量計測に基づく侵食地形解析、および土砂の生産・流出時系列における相互関係解析の方法について述べている。研究対象火山・流域については、火砕流噴火によって流域土砂移動環境が激変した初期段階から土砂生産・流出平衡化段階まで、地形変動・土砂流出情報が蓄積されている雲仙普賢岳・水無川としている。

II. 地形侵食と土砂流出の時系列変化解析

活火山噴火活動の土砂流出への影響については、細粒火山灰被覆による浸透能低下・表面流発生が最大要因としてあげられるが、流域表土層水文構造の変動推移把握が困難なことから、土砂生産変動指標として侵食地形に着目し、13 時期の空中写真解析により斜面地形変動実態解析をおこなっている。その結果、水無川本川の土砂生産はガリー侵食によるものであること、水無川支流（赤松谷・水無川上流・おしが谷）にみられる土砂生産活発化時期のずれは火砕流流下方向変化に対応していること、土砂流出変動の土砂収支解析結果は土砂生産変動の斜面地形解析結果に対応していること、などを明らかにしている。

III. 土砂生産・流出速度の時空間分布特性

土砂の生産・流出速度に着目した流域侵食の時空間変動分析の結果、土砂生産速度の推移には緩急があり、急速化と定常化を繰り返して平衡化に至ることを明らかにしている。すなわち土砂生産と土砂流出との量的関連について検討し、土砂生産速度の定常時には、土砂流出量が土砂生産量を下回り土砂滞留するが、この滞留土砂が大規模移動時に流出すること、このため期間内土砂収支は土砂生産量と土砂流出量はほぼ一致する結果を得ている。したがってガリー形成速度から求められる単位土砂生産速度は、単位土砂流出速度に良好に対応することから、土砂生産情報に基づいた土砂流出量予測が可能であるとの新知見を得ている。

IV. 土砂流出量の予測

土砂生産・流出の時系列変動解析から得た土砂流出平衡化過程における土砂流出速度と土砂生産速度の対応をもとに、任意時点の累加土砂流出量について、土砂流出速度(=土砂生産速度-滞留速度)を微分係数とし平衡化時に収束値に至る変動傾向モデル(土砂流出量累加変動式)を提示している。このモデル式を雲仙普賢岳の実測資料で検証し、土砂流出実績(44回土石流)の中途約1/2(24回)段階からの予測が最終実績に良好に適合する結果を得ている。さらに、有珠山1977-78噴火時土砂流出(土砂流出速度に2回のピーク)に適用を試み、土砂流出量累加変動式の2分割によって本モデルが適用できることを確認している。

V. 砂防計画への展開

侵食地形解析に基づく土砂生産速度からの土砂流出予測は、侵食様式の異なる他荒廃流域においても適用が可能であること、大規模地形変動にともなって土砂流出が継続する流域では土砂氾濫域が拡大するために段階的予測に基づいた土砂処理計画が必要となること、また多様な変動状況と近未来の流域危機管理に対する砂防計画展開が可能になることなどを論じている。

以上のように本研究は、斜面地形変動解析による土砂生産速度と土砂収支解析による土砂流出速度とが一致することを明かにし、これに基づいて構築した土砂流出予測モデルによる時系列的砂防計画手法を提示したものであり、その成果は学術・応用両面から高く評

価される。よって、審査員一同は、安養寺信夫が博士（農学）の学位を受ける十分な資格があるものと認定した。